Transport Canada / Transports Canada
Development / Développement

TP 5587E

Combined Cycle Propulsion System for LNG Carriers, based on the RB.211 Gas Turbine

Summary Report

Prepared for
Transportation
Development Centre
Transport Canada

JULY 1984

CA1
DIC 847
84
C516S
c.2

Canada

TP 5587E

SUMMARY REPORT
COMBINED CYCLE PROPULSION SYSTEM FOR LNG CARRIERS, BASED ON THE RB.211 GAS TURBINE

by

A.J. HIGSON
J.A. RIDGWAY
J. ZACKARY
B.B. TEDFORD

ROLLS ROYCE (CANADA) LIMITED
MONTREAL
CANADA

JULY 1984

The contents of this report reflect the views of the contractor and not necessarily the official views or policies of the Transportation Development Centre.

Également disponible en français

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP.5587E	6058	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Combined Cycle Propulsion System for LNG Carriers, based on the RB.211 Gas Turbine - Summary Report.	July 1984
	6. Performing Organization Report No.

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
A.J. Higson, J.A. Ridgway and B.B. Tedford	D.1450-143

9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Rolls-Royce (Canada) Limited P.O. Box 1000, Montreal AMF Montreal, Quebec, H4Y 1B7	11. DSS or Transport Canada Contract No. 6058

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre 1000 Sherbrooke St. W., Suite 2421 Montreal, Quebec, H3A 2R3	14. Sponsoring Agency Code

15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
Summary of TP.5586E "Combined Cycle Propulsion System for LNG Carriers, based on the RB.211 Gas Turbine."	C. Alfred Versailles

17. Abstract

This report discusses the performance, costs and Canadian content of a proposed combined gas and steam cycle (COGAS) propulsion system for LNG carriers, based on the ROLLS_Royce Marine RB.211 gas turbine. These were then compared with a marine reheat steam propulsion plant for the same duty.

Based on the requirements of a proposal to supply Canadian LNG to Japan (Western LNG Project), performance parameters of a marine propulsion system were generated using a proven gas turbine waste heat software package. From these, equipment specifications for the steam portion of the system were drawn up and distributed to a number of interested manufacturers for estimates of cost and Canadian content. Using their responses, a number of COGAS and "all steam" machinery arrangements were chosen and analysed.

All COGAS plants except the "small boiler" design were found to be over 40% more efficient than the reheat steam plants. Acquisition costs for both types of plant were found to be very nearly equal. Fuel cost savings of between one and two million dollars per year were estimated, depending on type of "make-up" fuel used. Manning requirements are nearly 50% less for COGAS plant. Canadian content can run as high as 50% for the gas turbine, 85% for the waste heat recovery unit and 100% for the steam turbine.

Combined cycle power for LNG carriers was found to be very competitive with reheat steam plant propulsion in first cost and superior to it in fuel cost and Canadian content.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Ship Propulsion System, Combined Cycle, Reheat Steam	Available on request from sponsoring agency

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	24	

TDC/CDT 79-005

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1. Nº du rapport Transports Canada	2. Nº de l'étude — CDT	3. Nº de catalogue du destinataire
Tp.5587E	6058	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
Combined Cycle Propulsion System for LNG Carriers, based on the RB.211 Gas Turbine - Rapport Sommaire.	Juillet 1984
	6. Nº du rapport de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. Nº de dossier Transports Canada
A.J. Higson, J.A. Ridgway and B.B. Tedford	D.1450-143

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. Nº de dossier — ASC
Rolls-Royce (Canada) Limited P.O. Box 1000, Montreal AMF Montreal, Quebec, H4Y 1B7	11. Nº de contrat — ASC ou Transports Canada 6058

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de rapport et période visée
Centre de développement des transports 1000 o. rue Sherbrooke, Suite 2421 Montreal, Quebec, H3A 2R3	14. Code de l'organisme parrain

15. Remarques additionnelles	16. Agent de projet — CDT
Sommaire de TP.5586E "Combined Cycle Propulsion System for LNG Carriers, based on the RB.211 Gas Turbine."	C. Alfred Versailles

17. Résumé

Ce rapport présente un système propulsif à cycle combiné pour méthaniers la turbine à gaz utilisée étant une Rolls-Royce RB.211 (version marine). Il compare ce système sous le rapport des performances attendues, du coût et du contenu canadien, à un système de propulsion navale classique à vapeur à resurchauffe.

Partant de la fiche technique du méthanier proposé pour le transport du GNL vers le Japon (projet Western LNG), les performances attendues du système propulsif nécessaire ont été définies grâce à un modèle informatique éprouvé, capable de figurer le cycle de fonctionnement d'un ensemble turbine à gaz/chaudière de récupération.

L'analyse a révélé que tous les systèmes à cycle combiné, sauf celui dit "à chaudière de faible puissance", affichent un rendement de 40 p.cent supérieur à celui des systèmes à resurchauffe, que les deux types de systèmes nécessitent des dépenses de premier établissement pratiquement égales et que les premiers dégagent une économie d'exploitation (combustible) de 1 à 2 millions de dollars selon le type de combustible d'appoint utilisé. Quant au personnel de conduie de la machinerie de propulsion, le système à cycle combiné autorise une réduction de presque 50 p.cent. Enfin, le contenu canadien de ce système pourra atteindre 50, 85 et 100 p.cent pour ce qui concerne la turbine à gaz, la chaudière de récupération et la turbine à vapeur respectivement.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Système de propulsion navale, cycle combiné, système vapeur à resurchauffe.	Sera fourni sur demande par le commanditaire.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non-classifiée	Non-classifiée	24	

CDT/TDC 79-005

FOREWORD

Large LNG carriers built and on order today are, almost without exception, powered with conventional steam turbine propulsion plants. However, the present level of bunker costs, together with rising future forecasts, is compelling designers and operators of LNG ships to look into ways of saving energy as one of the means of optimising the cost efficiency of their ships.

The main reason why steam plant, with its relatively low thermal efficiency, has been retained for LNG ships, whilst it has been displaced by the diesel engine in most other types of merchant ship, is that it can consume boil-off gas as fuel. It can burn mixtures of gas and liquid fuel in any proportion and, with the addition of some simple equipment, can handle an emergency boil-off situation. High efficiency diesel engines cannot use boil-off gas and alternative means of dealing with the boil-off are unattractive.

The widespread adoption of aero-derived gas turbines with a gas/liquid dual fuel burning capability for gas pumping applications, and their demonstrated reliability as warship propulsion engines suggests an alternative plant which could provide efficiencies similar to diesel propulsion whilst having the capability of using boil-off gas.

It is with this improved efficiency of propulsion in mind, that the Transportation Development Centre of Canada commissioned a study by Rolls-Royce (Canada) Limited to investigate a combined cycle (COGAS) system using the aero derivative Rolls-Royce RB.211 marinised gas generator and the Cooper Rolls RT56 power turbine, and to compare this system with a conventional steam plant.

CONTENTS

1.	Introduction	1
2.	Carrier Requirements	1
3.	Power Plant Considered	1
4.	Power Plant Design	1
5.	Performance Study	2
6.	Engineering Specification and Manufacturers Response	3
7.	Annual Fleet Operation	6
8.	Canadian Manufacturing Content	7
9.	Voyage Fuel Consumption and Costs	7
10.	Maintenance Requirements and Costs	7
11.	Plant Acquisition Costs	11
12.	Cost of Make-Up Fuel and Maintenance	11
13.	Manning Levels	15
14.	Conclusions and Recommendations	15

FIGURES

Figure 34 Heat Balance Diagram - COGAS

Figure 35 Heat Balance Diagram - 'All-Steam'

Figure 36 Plant Acquisition Costs

Figure 37 Canadian Manufacturing Content

Figure 38 Fuel Consumption and Cost per Leg of Voyage

Figure 39 Annual Fuel Consumption per Ship

NB. Figure numbers are taken from main report.

1. Introduction

This is a summary of the final report on a combined cycle propulsion system for LNG carriers commissioned by Transportation Development Centre. Several combined cycle systems based on the Rolls-Royce RB.211 gas turbine were developed and analysed for performance and Canadian content. These were then compared with a marine reheat steam propulsion system. All designs were based on the operational requirements of the Western LNG project between the west coast of Canada and Japan.

2. Carrier Requirements

The design of ship used for the study is based on that featured in the Western LNG Project. A standard LNG cargo capacity of 125 000 m^3 has been used contained in five spherical tanks at -163 deg.C. The system of containment is similar to that employed in the Moss Rosenberg vessel.

The size and power requirements are:

Loaded displacement	100 000 tonnes
Cargo weight	54 000 tonnes
Loaded propulsion power at shaft	18 387 kW
Ballast propulsion power at shaft	16 916 kW

The carrier will operate at the economical service speed of 17,5 knots which satisfies the prospective annual delivery schedule of 160,183 x 10^{12} kJ, during 1992-2006 using five carriers.

3. Power Plants Considered

The report examines the gas turbine combined cycle (COGAS) system, based on the RB.211/RT56 gas turbine, and compares its capital and running costs with those of a high efficiency reheat steam plant.

a) COGAS - gas turbine for main propulsion, with heat recovery boiler and steam turbine to augment power output of gas turbine at propeller shaft.

b) 'All-Steam' - reheat boiler with steam turbine.

4. Power Plant Design

a) COGAS

The prime mover is the highly successful combination of Rolls-Royce RB.211-24C gas generator with a Cooper Energy Services RT56 power turbine. The RB.211/RT56 gas turbine, used for gas pumping and offshore duties, has already accumulated over 200 000 operating hours in Canada with a

further 162 000 operating hours in Alaska, Mexico, Venezuela, Western Europe, and the North Sea. The RB.211/RT56 gas turbine, besides providing power to drive the ship's propeller via a main reduction gearbox also generates steam by passing the hot exhaust gases through a waste heat recovery boiler (WHRB). The steam generated, drives the propulsion steam turbine which provides additional power to drive the ship's propeller via the main reduction gearbox. The WHRB also provides steam for LNG vapour fuel heating, inner hull and ship's hotel and desalination.

The WHRB is designed to operate independently of the gas turbine, 'refiring' on gas fuel (LNG) using its own set of burners. To maintain a 'take-home' speed of 11 knots in the event of gas turbine shutdown, the WHRB is capable of operating at an equivalent maximum continuous rating in the refiring mode.

An auxiliary boiler is used in emergency condition and when the ship is in harbour to maintain ship's steam services with gas turbine and WHRB shut down.

A variable or controllable pitch propeller (CPP) is fitted to ensure that propulsion efficiency is maintained as well as providing excellent ship manoeuvrabiity.

b) 'All-Steam'

The steam plant is a conventional design comprising a reheat main boiler, reheat steam turbine and associated condenser. The reheat installation was considered as the main option because of the total plant improvement performance, in the order of 10-14% in thermal efficiency, over the non-reheat system.

The LP steam turbine incorporates a reversing turbine for astern operation and manoeuvring as the propeller is of the fixed pitch type (FPP)

The design of reheat boiler considered is installed in the 'Energy' class of oil product carriers built by Sasebo Heavy Industries Co. Ltd.

If the LNG burning main reheat boiler should fail, then the auxiliary 'take-home' boiler will supply sufficient propulsion steam to the main turbine in addition to meeting all 'at-sea' steam requirements.

5. Performance Study

A computerised combined cycle simulation program showed that to satisfy the propulsion power required to maintain 17,5 knots, a

total 'at-sea' power of 21 404 kW was arrived at with an 'at-sea' RB.211/RT5o output flange power of 16 331 kW.

In the event of the WHRB being inoperative, then a bypass is used so that the gas turbine can be taken up to its maximum continuous rating of 25 079 kW at 9 deg.C.

The COGAS design used demonstrates the maximum efficiency of operation that can be achieved within practical limits of boiler size and cost. The system is simple, flexible in operation, has good part power efficiency, is moderately rated and as such will have a long life.

For comparison of the COGAS and 'all-steam' plants, heat balance diagrams, Figs. 34 and 35 are included in the report.

6. Engineering Specification and Manufacturers' Response

a) Engineering Specification

Various equipment manufacturers were approached during the initial study, to gauge willingness to participate in the project.

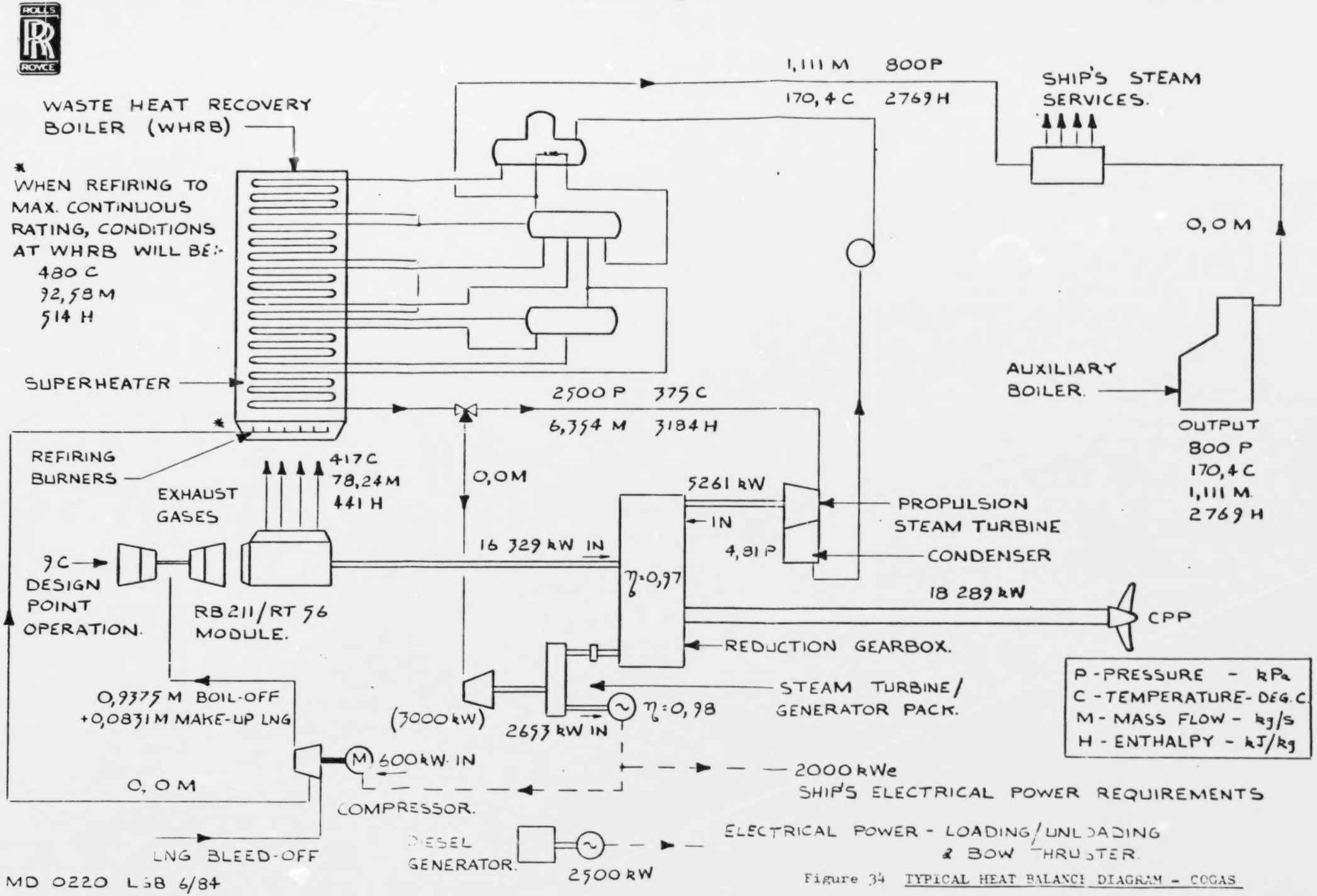
The enquiry specification for COGAS and 'all-steam' plants were sent out to various equipment manufacturers who were invited to quote for the competitive plants.

- Design parameters were laid down
- Design and safety codes quoted
- Enquiry stating importance of Canadian content was stressed, in order that the equipment appeared as attractive as possible to TDC.

b) List of Manufacturers Invited to Quote

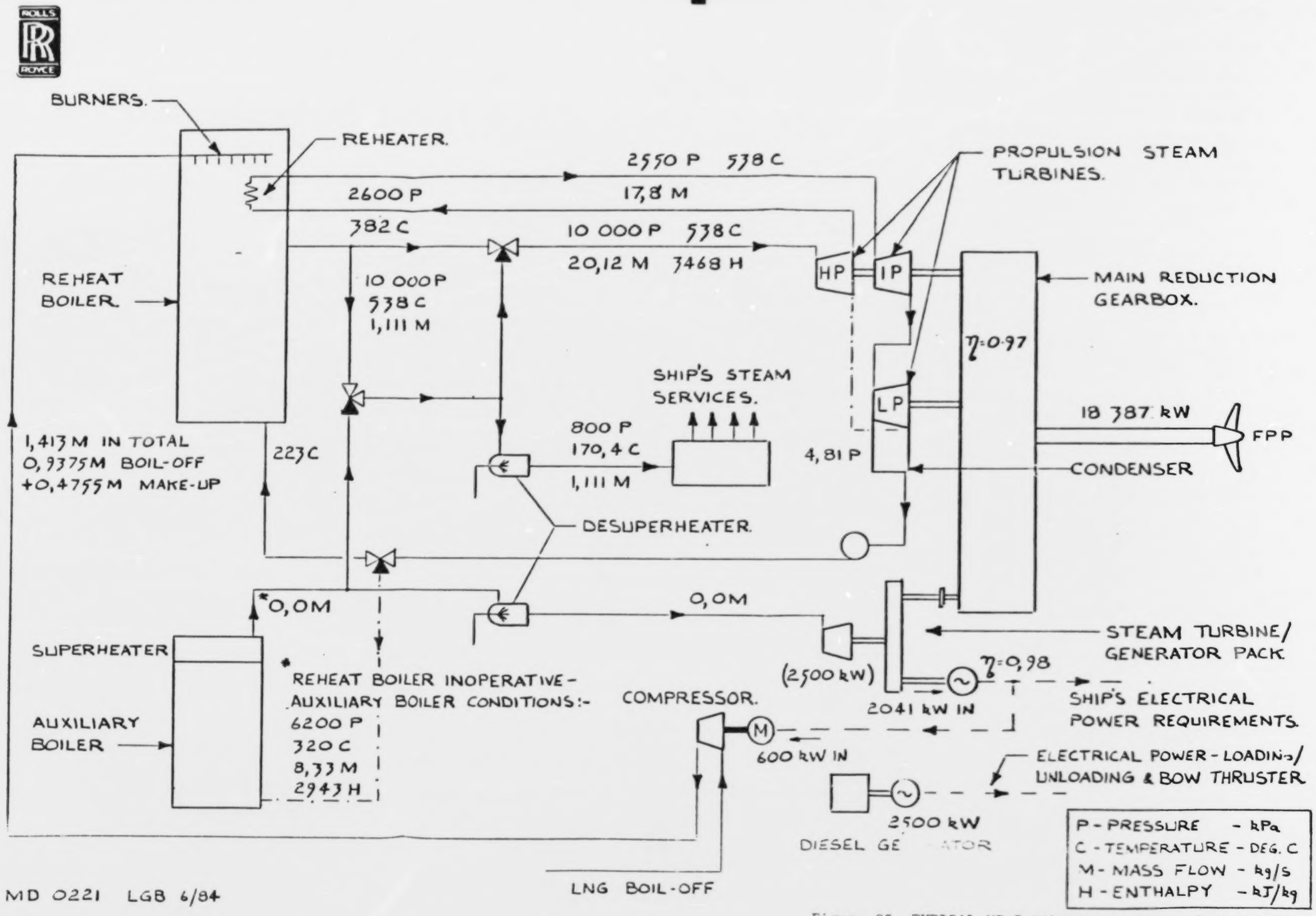
Boilers

- NEI International Combustion (Cochran) Limited
  - due to lack of resources passed work to sister company NEI Nuclear Systems Limited - responded.
- Aalborg-Vaerft A/S, Denmark
  - keen initially, did not respond finally
- E. Green & Sons Limited (now Senior Green Limited)
  - responded
- Sunrod A.B., Sweden
  - responded
- Bigelow Liptak of Canada Limited



MD 0220 LSB 6/84

Figure 34 TYPICAL HEAT BALANCE DIAGRAM - COGAS



MD 0221 LGB 6/84

Figure 35 TYPICAL HEAT BALANCE DIAGRAM - 'ALL-STEAM'

- responded but later declined to participate

- Kawasaki Heavy Industries
  - keen initially, did not respond finally

- Babcock & Wilcox (Canada) Limited
  - responded (reheat boiler)

Steam Turbines

- GEC Turbine Generators Limited
  - responded

- Westinghouse (Canada) Inc.
  - responded

- De Laval Turbine (Canada) Limited
  - no response

- Kawasaki Heavy Industries
  - no response

From the response and suggested alternative of having an LP loop built into the WHRB to provide ship's steam services, the design point setting of the gas turbine output power could be reduced from 16 816 kW to 16 331 kW. This is achieved by making better use of the available gas turbine exhaust energy.

a) Small COGAS

NEI submission using LP loop design but keeping the gas turbine output power at 16 816 kW - small boiler.

b) Large COGAS

Foster Wheeler, Sunrod and Green's submissions using LP loop design but with the reduced gas turbine output power of 16 331 kW - large boiler.

Refer to Section 8 for Canadian Manufacturing Content.

7. Annual Fleet Operation

On the basis of the voyage profile and cargo boil-off rates at the design ambient temperature, the annual delivery during the period of maximum delivery, 1992-2006, is satisfied by the following:

Loaded cargo boil-off interval	11 days, 18 hours
Ballast cargo boil-off interval	11 days, 6 hours
Loaded cargo	54 000 tonnes

Fuel delivered per round trip	2,5614 x 10^{12} kJ (52 125 tonnes)
Annual delivery required during period 1992-2006	160,18 x 10^{12} kJ
Total annual round trip required	62,54
Average trips/ship/anuum (5 ships)	12,5 say 13
Average annual service time per ship	313 days

8. Canadian Manufacturing Content

The percentage Canadian manufacturing content of each equipment manufacturer who responded to the enquiry specification and of the Rolls-Royce Canada Ltd RB211/RT56 gas turbine, are tabled in Figure 37.

9. Voyage Fuel Consumption and Costs

Over the proposed sea route from Prince Rupert British Columbia, and Osaka, Japan and return, refer to Figure 38 for fuel consumption and cost, and Figure 39 for annual consumption and cost based on 13 trips per year.

10. Maintenance Requirements and Costs

10.1 RB211 Gas Generator Maintenance

The RB211 is designed to operate on an on-condition basis, which means that it is not mandatory to remove a component unless performance inspection proves it to be necessary. The RB211 is constructed on a modular basis, ie. 5 major modules and 3 mini modules, which enables component parts to be quickly exchanged as required.

The RB211 is subject to inspection periods appropriate to the operation of the LNG carrier ie. appropriate inspections are carried out at weekly, 4000, 10 000, 16 000, 24 000, 30 000 and 60 000 hour intervals. Note 60 000 hour interval applies to the RT56 power turbine only. All maintenance actions may be done on board ship except for the 24 000 hour gas generator overhaul and some parts of the 60 000 hour power turbine inspection.

10.2 RB211/RT56 Maintenance Costs

An overall maintenance cost of C$ 10,16 per hour of operation has been established by operators of RB211/RT56 units on gas pumping offshore duties.

For an LNG carier operating 13 round trips from Canada to Japan per year, this represents a cost of C$ 73 152 per year which is approximately 1,5 per cent per annum of the capital cost of the

CANADIAN MANUFACTURING CONTENT

MANUFACTURER	TYPE OF PLANT	CANADIAN MANUFACTURING CONTENT
Rolls-Royce Canada Ltd.	RB 211/RT 56 Gas Turbine	50%
Foster Wheeler Power Products Ltd.	COGAS recovery boiler	85%
	All-steam reheat boiler	85%
Sunrod AB Sweden	COGAS recovery boiler	Prepared to source all parts other than boilers themselves in Canada
	All-steam reheat boiler	
Senior Green Ltd.	COGAS recovery boiler	Can confirm a high proportion of Canadian manufacture
N.E.I.	COGAS recovery boiler	Licensing arrangements under discussion with Canadian Manufacturers
G.E.C.Turbine Generators Ltd.	COGAS steam turbine	35%
	All-steam reheat turbine	35%
Westinghouse Canada	COGAS steam turbine	100%

Figure 37 CANADIAN MANUFACTURING CONTENT

FUEL CONSUMPTION AND COST,
LOADED LEG/BALLAST LEG
240 HOURS @ 17,5 KNOTS, 9 DEG C

	Small COGAS	Large COGAS	All-Steam Reheat
Total LNG ship requirement (all-purpose) T/h	3,764/3,59	3,674/3,497	5,086/4,78
Boil-off LNG flow T/h	3,375/2,7	3,375/2,7	3,375/2,7
LNG forced vaporisation for make-up T/h	0,389/0,890	0,299/0,797	1,711/2,080
Cost of make-up US $	18159/41545	13957/37204	79870/97094
Marine diesel make-up (COGAS) T/h or Fuel oil make-up 'All-Steam' T/h	0,446/1,022	0,343/0,915	1,877/2,282
Cost of make-up US $	24833/56905	19098/50947	62617/76128

Figure 38 FUEL CONSUMPTION AND COST FOR LOADED AND BALLAST LEGS

ANNUAL CONSUMPTION PER SHIP BASED ON 13 TRIPS PER YEAR METRIC TONNES

	Small COGAS	Large COGAS	All-Steam Reheat
Make-up from vaporised LNG	3991	3420	11 828
Make-up from marine diesel (COGAS) or Make-up from fuel oil 'All-Steam'	4580	3925	12 976

ANNUAL COST PER SHIP BASED ON 13 TRIPS PER YEAR US $

	Small COGAS	Large COGAS	All-Steam Plant
Make-up from vaporised LNG	776 152	665 093	2 300 532
Make-up from marine diesel (COGAS) or Make-up from fuel oil 'All-Steam'	1 062 594	910 585	1 803 685

BASED ON MDO @ 232 US $ Tonne MFO @ 139 US $ Tonne
LNG (FOB) @ 194,5 US $ Tonne

Figure 39 ANNUAL FUEL COSTS AND CONSUMPTION PER SHIP

RB211/RT56 unit.

10.3 Small COGAS

Not considered because of the high initial plant cost.

10.4 Large COGAS

The manufacturer's estimate for maintenance costs is C$ 75 000 per annum.

10.5 'All Steam'

The manufacturer's estimate for maintenance costs is C$ 98 750 per annum.

11. Plant Acquisition Costs

Acquisition budgetary costs were obtained from suppliers and are shown tabulated in Figure 36 sheets 1,2 and 3. The cost of the propellers and shafting is included to reflect the difference between the COGAS CCP and 'all-steam' FPP plants. No costs are shown for the main reduction gearbox or control system because it is considered that the costs for such items would be similar.

The shipping and insurance costs were obtained from Rolls-Royce Ltd shipping agents and considered the cost of shipping of a complete propulsion plant package.

Although the individual manufacturers components vary in cost, the table shows the overall plant costs for both the COGAS 'all-steam' system in the order of 10 million Canadian dollars. For this reason therefore, it was considered unnecessary to undertake an amortization analysis.

12. Cost of Make-Up Fuel and Maintenance

The results of a costing comparison of make-up fuel and maintenance requirements for both COGAS and 'all-steam' plants for a 10 year operational period as follows:-

	Cost in C$, Make-Up Fuel and Maintenance
All-Steam Plant	31 110 660
COGAS Plant	10 190 250
COGAS Plant Cost Saving	20 920 410

With diesel or fuel oil make-up

PLANT ACQUISITION COSTS

(Canadian dollars (Million) per ship set)

COGAS

	OPTION A				OPTION B				
	Supplier	COSTS Main Plant	COSTS Spares, Tooling	Shpg: Ins.	Supplier	COSTS Main Plant	COSTS Spares, Tooling	Shpg: Ins.	
Main Boiler	N.E.I. WH RB	1,67	0,03		Foster Wheeler WH RB	1,43	0,045		NOTES:
Auxiliary Boiler	N.E.I.				Greens	0,07	0,002		The budgetary costs in Canadian dollars are based on an exchange rate of 1,8 C $ to 1,0 pound sterling. For "Sunrod" an exchange rate of 6,5 Swedish Krona to 1,0 Canadian dollars has been assumed.
Main Steam Turbine	Westinghouse	0,55	Incl. in main cost	0,16	Westinghouse	0,55		0,15	The cost of the main plant is generally given FOB at the port of the country of manufacture.
Auxiliary Steam Turbine Condenser	Westinghouse	0,63	Incl. in main cost		Westinghouse	0,63	Incl. in main cost		Shipping cost estimates allow for shipping from the country of manufacture to an assumed shipbuilder in Kobe, Japan, or similar. An allowance for crating, where applicable, has been made in the shipping costs.
Generator	Westinghouse				Westinghouse				Options A and B are considered to be the main options for the COGAS plant, the remaining three are shown for comparison.
Propellers and Shafting	Stone Vickers	0,86	Incl.in main cost		Stone Vickers	0,86	Incl. in main cost		Spare provisioning for the RB 211/RT 56 considers a basic 5 ship fleet with base spares of one complete gas generator and two 04 module hot sections and combustion units.
Gas Turbine	RB 211 Gas Generator RT 56 Power Turbine	5,04	0,99	0,07	RB 211 Gas Generator RT 56 Power Turbine	5,04	0,99	0,07	
Sub total		8,75	1,02	0,23		8,58	1,04	0,22	
Total			10				9,84		

Figure 36 PLANT ACQUISITION COSTS (Sheet 1)

PLANT ACQUISITION COSTS
(Canadian dollars (Million) per ship set)

COGAS

		COSTS				COSTS				COSTS		
	Supplier	Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.	Supplier	Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.	Supplier	Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.
Main Boiler	Foster Wheeler	1,43	0,045		Greens	0,87	0,03		Sunrod	2,86	0,1	
Auxiliary Boiler	Greens	0,072	0,002		Greens	0,072	0,002		Sunrod	0,05	0,0018	
Main Steam Turbine	G.E.C.	0,814	Incl.in main cost	0,18	Westinghouse	0,55	Incl.in main cost	0,12	Westinghouse	0,55	Incl.in main cost	0,15
Auxiliary Steam Turbine and Condenser Generator	Westinghouse Westinghouse	0,63	Incl.in main cost		Westinghouse Westinghouse	0,63	Incl.in main cost		Westinghouse Westinghouse	0,63	Incl.in main cost	
Propellers & Shafting	Stone Vickers	0,86	Incl.in main cost	-	Stone Vickers	0,86	Incl.in main cost		Stone Vickers	0,86	Incl.in main cost	
Gas Turbine	RB 211 RT 56 Power Turbine	5,04	0,99	0,07	RB 211 Gas Generator RT 56 Power Turbine	5,04	0,99	0,07	RB 211 Gas Generator RT 56 Power Turbine	5,04	0,99	0,07
Sub total		8,85	1,04	0,25		8,02	1,02	0,19		9,99	1,092	0,22
Total		10,14				9,23				11,3		

Figure 36 PLANT ACQUISITION COSTS (Sheet 2)

PLANT ACQUISITION COSTS

(Canadian dollars (Million) per ship set)

ALL-STEAM

	OPTION C								
	Supplier	COSTS			Supplier	COSTS			
		Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.		Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.	
Main Boiler	Foster Wheeler	2,63	0,09		Sunrod				NOTES: Option C is considered as the main contender for the 'All-Steam' plant. The other plant combination is shown for comparison
Auxiliary Boiler	Foster Wheeler	1,32	0,03		Sunrod				
Main Steam Turbine	G.E.C.	4,25	Incl. in main cost	0,56	G.E.C.	4,25	Inc. in main cost	0,60	
Auxiliary Steam Turbine and Condenser and Generator	Westinghouse	0,63	Incl. in main cost		Westinghouse	0,63	Inc. in main cost		
Propellers & Shafting	-	0,4	Incl. in main cost		-	0,4	Incl.in main cost		
Sub total		9,23	0,14	0,56		9,9	0,16	0,60	
Total			9,93				10,66		

Figure 3 : PLANT ACQUISITION COSTS (Sheet 3)

	Cost in C$, Make-Up Fuel and Maintenace
All-Steam Plant	24 604 950
COGAS Plant	13 404 720
COGAS Plant Cost Saving	11 200 230

Pro-rata cost savings would apply up to 20 years operations subject to inflation.

Assumed currency rate of exchange to mid June 1984 of

1 USA $ = 1,3 Canadian $
1 pound sterling = 1,8 Canadian $

13. Manning Levels

A gas turbine COGAS ship will require a smaller crew than a comparable 'all-steam' turbine vessel ie. out of a total crew of perhaps 30 the COGAS ship will require an engineering department of about 6 men as against about 11 men for the 'all-steam' ship.

The COGAS system is designed for unattended operation at all times whilst the reheat type of steam plant, because of its many pieces of equipment, has usually been denied operation with the minimum number of personnel.

14. Conclusions and Recommendations

- CONCLUSIONS

Two sensible and perfectly feasible propulsion machinery solutions have been investigated.

The 'all-steam' plant which uses a reheat steam boiler and turbine represents current state of the art of this type of technology. The reheat system is well proven and is the modern solution for LNG carrier propulsion.

The RB.211 based gas turbine combined cycle plant is a slightly novel but nevertheless competitive alternative propulsion solution. The COGAS plant combines well proven gas turbine engineering with established waste heat recovery and steam turbine technology.

This study has considered the practicalities of the propulsion system beginning with the formulation of conceptual designs to provide a framework around which to develop engineering specifications, to obtain detailed engineering responses and financial guidance and finally to assess the cost competitiveness of the two main proposals.

The 'all-steam' plant uses standard equipment, although

advanced designs using greater temperatures and pressures yielding better cycle efficiencies are available. These types of steam plant are not yet proven and so were not considered to be a practical solution to the problem.

The efficiency of the COGAS system is mostly dependant upon the extent to which the waste heat boiler is able to recover heat from the gas turbine exhaust. This ability is dictated by the tube area in the boiler which is in turn governed by the limits of a practical size of plant. By careful design of the boiler in order to maximise the tail cycle efficiency a good overall efficiency can be achieved with moderate plant size. This type of approach has been used in the study to provide a reliable and practical design solution for a plant which will meet the requirements of the ship.

Both types of plant offer good levels of redundancy in case of failure of items of the main propulsion plant. In the all-steam option shutdown of the main reheat boiler will mean that the auxiliary boiler will supply steam to the H.P. stages of the main steam turbine to get the ship home. The situation is slightly improved for the COGAS system since complete shutdown of either the steam turbine or the gas turbine can be tolerated. In this event the ship will still be capable of the 11 knots take-home condition.

As mentioned in the section on Plant Installation, discussion of the precise type of gearbox, it's cost and overhaul aspects, was not included as part of this study. Two preliminary designs were made as part of the work involved in the preparation of the installation drawings for the 'all-steam' and COGAS plants, but more work will need to be carried out as part of a further study.

Fuel cost calculations clearly demonstrate the savings of the COGAS type of plant as compared with the reheat design. The actual savings depend upon the type of fuel used for supplementing the natural boil-off (only necessary during open water sailing) and the relative costs of these fuels. With LNG as the only type of fuel used onboard the annual saving per ship is estimated to be 1,6 Million US$ (price does not take account of fuel required to force boil the LNG for make-up). If it is not intended to force boil the cargo LNG then the dual fuel COGAS plant will use marine diesel as the make-up fuel.

Under the same conditions the reheat plant is capable of burning less expensive marine fuel oil as make-up instead of vapourised LNG and clearly this would be the most economical solution if an 'all-steam' plant were chosen.

Although the COGAS plant requires marine diesel as make-up (an expensive fuel), the annual saving is still estimated to be about 0,8M US$ compared with the reheat plant using fuel oil as make-up.

The large COGAS design using LNG as the make-up fuel therefore represents the most fuel economic means of ship propulsion investigated during this study.

- RECOMMENDATIONS

This study has been limited to investigating performance and cost aspects of a combined cycle gas turbine based plant as compared with a conventional reheat steam plant. Sufficient work has been done to show that the COGAS plant is feasible and offers both potential operating savings and the possibility of a significant amount of high technology work in Canada.

A COGAS plant could confidently be selected for any future LNG carrier of the type considered in the study. However there are a number of areas in which further investigation would be helpful in providing a basis for preparation of the specification for such a vessel. These include

1. Comparison of controllable pitch propeller systems with alternative reversing gearbox systems.

2. Comparison of alternative means of providing ship's electric power.

3. More detailed studies of maintenance, overhaul and manning costs for the complete machinery plant.

4. Analysis of the control requirements of a combined cycle plant and simulation of the overall plant dynamic performance.

5. An overall ship study to check the interaction with the ship design of the different machinery systems to give an overall cost/benefit analysis.

Rolls-Royce (Canada) Ltd would be pleased to discuss participation in further studies to investigate these and other relevant areas.

Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 5587F

Système propulsif à cycle combiné pour méthaniers, construit autour d'une turbine à gaz RB.211

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports
Transports Canada

JUILLET 1984

CA1
DTC 847
84
C516SZ
c.2

Canada

TP 5587F

RAPPORT SOMMAIRE

SYSTÈME PROPULSIF À CYCLE COMBINÉ POUR MÉTHANIERS, CONSTRUIT AUTOUR D'UNE TURBINE À GAZ RB.211

fair par MM.:

A.J. HIGSON

J.A. RIDGWAY

J. ZACHARY

B.B. TEDFORD

ROLLS-ROYCE (CANADA) LIMITED

MONTREAL

CANADA

JUILLET 1984

Les opinions exprimées dans ce rapport sont celles du contractant et ne correspondent pas nécessairement aux opinions ou aux vues du Centre de développement des transports.

Also available in English.

L'EQUIPE DE PROJET

L'équipe de projet pour Rolls-Royce se composaient de:

M. I.T. Bowen
M. L.G. Brown
M. M.J. Neeves
M. J.A. Ridgway
M. B.B. Tedford
M. D.K. Tyler
M. J. Zachary

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1. Nº du rapport Transports Canada	2. Nº de l'étude — CDT	3. Nº de catalogue du destinataire
TP.5587F	6058	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
Système propulsif à cycle combiné pour méthaniers construit autour d'une turbine à gaz RB.211 - Rapport Sommaire.	Juillet 1984
	6. Nº du rapport de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. Nº de dossier Transports Canada
A.J. Higson, J.A. Ridgway and B.B. Tedford	D.1450-143

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. Nº de dossier — ASC
Rolls-Royce (Canada) Ltd. P.O. Box 1000, Montreal AMF Montreal, Quebec, H4Y 1B7	11. Nº de contrat — ASC ou Transports Canada 6058

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de rapport et période visée
Centre de développement des transports 1000 o., rue Sherbrooke, suite 2421 Montreal, Quebec, H3A 2R3	14. Code de l'organisme parrain

15. Remarques additionnelles	16. Agent de projet — CDT
Sommaire de TP.5586E "Combined Cycle Propulsion System for LNG Carriers, based on the RB.211 Gas Turbine."	C. Alfred Versailles

17. Résumé

Ce rapport présente un système propulsif à cycle combiné pour méthaniers, la turbine à gaz utilisée étant une Rolls-Royce RB.211 (Version marine). Il compare ce système sous le rapport des performances attendues, du coût et du contenu canadien, à un système de propulsion navale classique à vapeur à resurchauffe.

Partant de la fiche technique du méthanier proposé pour le transport du GNL vers le Japon (projet Western LNG), les performances attendues du système propulsif nécessaire ont été définies grâce à un modèle informatique éprouvé, capable de figurer le cycle de fonctionnement d'un ensemble turbine à gaz/chaudière de récupération.

L'analyse a révélé que tous les systèmes à cycle combiné, sauf celui dit "à chaudière de faible puissance", affichent un rendement de 40 p.cent supérieur à celui des systèmes à resurchauffe, que les deux types de systèmes nécessitent des dépenses de premier établissement pratiquement égales et que les premiers dégagent une économie d'exploitation (combustible) de 1 à 2 millions de dollars selon le type de combustible d'appoint utilisé. Quant au personnel de conduite de la machinerie de propulsion, le système à cycle combiné autorise une réduction de presque 50 p.cent. Enfin, le contenu canadien de ce système pourra atteindre 50, 85 et 100 p.cent pour ce qui concerne la turbine à gaz, la chaudière de récupération et la turbine à vapeur respectivement.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Système de propulsion navale, cycle combiné, système vapeur à resurchauffe.	Sera fourni sur demande par le commanditaire.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non-classifiée	Non-classifiée		

CDT/TDC 79-005

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP.5587F	6058	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Système propulsif à cycle combiné pour mèthaniers construit autour d'une turbine à gaz RB.211 - Rapport Sommaire.	July 1984
	6. Performing Organization Report No.

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
A.J. Higson, J.A. Ridgway and B.B. Tedford	D.1450-143

9. Performing Organization Name and Address	10. DSS File No.
Rolls-Royce (Canada) Limited P.O. Box 1000, Montreal AMF Montreal, Quebec, H4Y 1B7	11. DSS or Transport Canada Contract No. 6058

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Report and Period Covered
Transportation Development Centre 1000 Sherbrooke St. W., Suite 2421 Montreal, Quebec, H3A 2R3	14. Sponsoring Agency Code

15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer
Summary of TP.5586E "Combined Cycle Propulsion System for LNG Carriers, based on the RB.211 Gas Turbine."	C. Alfred Versailles

17. Abstract

This report discusses the performance, costs and Canadian content of a proposed combined gas and steam cycle (COGAS) propulsion system for LNG carriers, based on the Rolls-Royce Marine RB.211 gas turbine. These were then compared with a marine reheat steam propulsion plant for the same duty.

Based on the requirements of a proposal to supply Canadian LNG to Japan (Western LNG Project), performance parameters of a marine propulsion system were generated using a proven gas turbine waste heat software package. From these, equipment specifications for the steam portion of the system were drawn up and distributed to a number of interested manufacturers for estimates of cost and Canadian content. Using their responses, a number of COGAS and "all steam" machinery arrangements were chosen and analysed.

All COGAS plants except the "small boiler" design were found to be over 40% more efficient than the reheat steam plants. Acquisition costs for both types of plant were found to be very nearly equal. Fuel cost savings of between one and two million dollars per year were estimated, depending on type of "make-up" fuel used. Manning requirements are nearly 50% less for COGAS plant. Canadian content can run as high as 50% for the gas turbine, 85% for the waste heat recovery unit and 100% for the steam turbine.

Combines cycle power for LNG carriers was found to be very competitive with reheat steam plant propulsion in first cost and superior to it in fuel cost and Canadian content.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Ship Propulsion System, Combined Cycle, Reheat Steam	Available on request from sponsoring agency.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	25	

AVANT-PROPOS

Les gros méthaniers en construction et ceux qui figurent déja dans les carnets de commande seront encore équipés presque sans exception d'un système de propulsion classique à vapeur. Mais, déjà, vu les prix actuels des fuel-oils et les nouvelles hausses prévisibles, les constructeurs et les armateurs de méthaniers sont à la recherche de moyens d'optimiser le bilan d'exploitation de ces navires, notamment par la réduction de la consommation.

Si la chaudière à vapeur classique reste, malgré un rendement thermique relativement bas, le moyen privilégié pour la propulsion des méthaniers, alors qu'elle a été remplacée par le moteur diesel sur la plupart des autres types de navires marchands, c'est parce que cette chaudière peut brûler des mélanges de combustibles gazeux et liquides dans n'importe quelle proportion et, au besoin, ne brûler que du gaz de vaporisation, moyennant l'ajout de quelques équipements accessoires simples. Les moteurs diesel à randement élevé ne peuvent, eux, brûler des gaz de vaporisation dont la combustion représente pourtant la seule voie de récupération intéressante.

Une solution de rechange qui promet un rendement thermique égal à celui du moteur diesel et qui fait appel au gaz de vaporisation comme combustible de base est apportée par la turbine à gaz dérivée des modèles aéronautiques et dont l'emploi s'est généralisé comme organe de propulsion de navires de guerre, après avoir fait ses preuves dans le pompage de gaz en forages marins. Un des avantages de la turbine à gaz est justement la capacité de brûler deux types de combustibles différents, liquide et gazeux.

Cherchant à obtenir une amélioration dans le rendement thermique des systèmes de propulsion, le Centre de développement des transports a confié à Rolls-Royce (Canada) Limitée l'étude d'un système à cycle combiné construit autour de la turbine à gaz Rolls-Royce RB.211/RT56 formée du générateur à gaz RB.211 navalisé et de la turbine Cooper Rolls RT56, suivie d'une étude comparative par rapport à un système classique à vapeur.

TABLES DES MATIÈRES

1.	Introduction	p.1
2.	Fiche technique des méthaniers	p.1
3.	Systèmes propulsifs	p.1
4.	Caractéristiques des systèmes considérés	p.2
5.	Simulation des performances	p.3
6.	Descriptif et estimatifs	p.3
7.	Programme d'exploitation annuel de la flotte	p.5
8.	Contenu canadien	p.6
9.	Consommation et coût par voyage aller-retour	p.6
10.	Sujétions et coûts d'entretien mécanique	p.6
11.	Coût de premier établissement	p.7
12.	Coût du combustible d'appoint et de l'entretien mécanique	p.7
13.	Personnel de conduite	p.8
14.	Conclusions et recommandations	p.8

FIGURES

Figure 34	Schéma de principe - système à cycle combiné	p.13
Figure 35	Schéma de principe - système tout vapeur	p.15
Figure 36	Coût de premier établissement	p.17,19,21
Figure 37	Contenu canadien	p.22
Figure 38	Consommation et coût par voyage, marche en charge et sur lest	p.23
Figure 39	Consommation et coût par navire et par an	p.24

N.B.: Les chiffres correspondent à ceux qui figurent dans le texte.

1. Introduction

Ce document résume le rapport final sur le système propulsif à cycle combiné pour méthaniers, dont l'étude a été commandée par le Centre de développement des transports. Il analyse un certain nombre de schémas à cycle combiné, construits autour de la turbine à gaz Rolls-Royce RB.211, et les compare à un système de propulsion navale classique à vapeur à resurchauffe, sous le rapport des performances attendues et du contenu canadien. Tous les schémas considérés visent à satisfaire aux exigences définies pour le projet de transport de GNL vers le Japon (projet Western LNG).

2. Fiche technique des méthaniers

L'étude du système propulsif se fonde sur les caractéristiques définies dans ledit projet, c'est-à-dire une charge utile de 125 000 m^3 de GNL, répartie dans cinq réservoirs sphériques maintenus à -163 °C, semblables à ceux du méthanier Moss-Rosenberg.

Les caractéristiques définies sont les suivantes:

Déplacement en charge	100 000 tonnes
Portée utile	54 000 tonnes
Puissance à l'arbre, en charge	18 387 kW
Puissance à l'arbre, sur lest	16 916 kW

La vitesse de service économique de 17 1/2 noeuds satisfait au programme des livraisons prévu pour les années 1992 à 2006, soit 160 183 x 10^{12} kJ par an pour cinq méthaniers.

3. Systèmes propulsifs

Le présent rapport considère un système propulsif à cycle combiné, associé à la turbine à gaz Rolls-Royce RB.211, dont il compare les coûts d'investissement et les frais d'exploitation à ceux d'un système à vapeur à resurchauffe de grande efficacité.

a) Système à cycle combiné: comportant une turbine à gaz agissant comme système propulsif de base, associée à un ensemble chaudière de récupération/turbine à vapeur pour relever la puissance totale délivrée à l'arbre.

b) Système "tout vapeur", c'est-à-dire une chaudière à resurchauffer - couplée à une turbine à vapeur.

4. Caractéristiques des systèmes considérés

a) Cycle combiné

Le groupe motopropulseur considéré est celui qui a fait si brillamment ses preuves, c'est-à-dire un générateur à gaz Rolls-Royce RB.211-24C couplé à une turbine de travail Cooper Energy Services RT56. L'ensemble RB.211/RT56 utilisé pour le pompage de gaz et en forages marins a accumulé plus de 20 000 heures de travail au Canada et 162 000 heures ailleurs; Alaska, Mexique, Venezuela, Europe occidentale et mer du Nord. En plus d'assurer la propulsion de base du navire par l'intermédiaire du réducteur de vitesses principal, cette turbine à gaz produit de la vapeur par l'intermédiaire de ses gaz d'échappement qui servent à la chauffe d'une chaudière de récupération. Cette vapeur entraîne une turbine de propulsion d'appoint qui fournit les pointes de puissance,également par l'intermédiaire du réducteur de vitesses principal. Une partie de la vapeur produite sert à la vaporisation forcée du GNL et à divers autres usages: chauffage de la coque intérieure, de l'espace habité, de l'appareil de dessalement.

La chaudière de récupération peut aussi fonctionner en chaudière à combustion autonome, étant équipée de brûleurs alimentés au GNL. Elle est capable, en cas de panne de laturbine à gaz, de fournir une puissance maximale en service continu suffisante pour faire avancer le navire à 11 noeuds.

Cette chaudière est doublée d'une chaudière d'appoint servant pour les situations d'urgence et à quai, lorsque le groupe motopropulseur principal est arrêté.

Une hélice à pas variable assure en rendement propulsif élevé en plus de permettre une meilleure manoeuvrabilité.

b) "Tout vapeur"

De conception classique, ce système propulsif comporte une chaudière à resurchauffeur et une turbine à vapeur de resurchauffe avec condenseur. Ce système à vapeur de resurchauffe avait été considéré comme la principale solution de rechange, étant donné l'accroissement dans le rendement global de l'ordre de 10 à 14 p. cent qu'il autorisait, par rapport au système sans resurchauffe.

La turbine vapeur BP à marche réversible permet de renverser la vapeur et de manoeuvrer en marche arrière, étant donné que l'hélice est du type à pas fixe.

C'est le type de système à resurchauffe à bord des navires-citernes construits par la Sasebo Heavy Industries Co. Ltd.

Advenant une défaillance de la chaudière principale brûlant du GNL, la relève est prise par une chaudière d'appoint capable de fournir une puissance propulsive suffisante pour satisfaire à tous les besoins, y compris ceux de la navigation en haute mer.

5. Simulation des performances

Une étude par modélisation du programme de marche sur cycle combiné a montré que, pour maintenir une allure de marche de 17 1/2 noeuds, il fallait disposer d'une puissance en mer globale totalisant 21 404 kW et d'une puissance à la sortie de la turbine de 16 331 kW.

Advenant une défaillance de la chaudière à récupération, un by-pass est alors utilisé pour que la turbine à gaz puisse être menée à sa puissance maximale en service continu de 25 079 kW, à partir d'une température ambiante de référence de 9°C.

Le schéma à cycle combiné considéré donne un rendement thermique le plus élevé possible, compte tenu des sujétions d'encombrement et de coût de la chaudière. En outre, il est simple et souple d'emploi, donne un bon rendement en charge partielle et, comme il fonctionne en-dessous de sa puissance nominale, est assuré d'une bonne durée de vie.

Les figures 34 et 35 permettent la comparaison du système à cycle combiné et du système "tout vapeur", sous le rapport du bilan thermique qui les caractérise.

6. Descriptif et estimatifs

a) Descriptif

En cours d'étude, un certain nombre de fabricants avaient été pressentis pour savoir s'ils seraient intéressés à soumissionner éventuellement.

Les descriptifs concernant les groupes motopropulsuers à cycle combiné et "tout vapeur" leur ont été adressés avec l'invitation d'établir les devis estimatifs correspondants.

- Les paramètres de calcul avaient été clairement déterminés.

- Les normes de construction et les exigences de sécurité clairement précisées.

- L'accent avait été mis sur le contenu canadien à prévoir et de nature à rendre les soumissions intéressantes au CDT.

b) Liste des fabricants pressentis

Chaudières

- NEI International Combustion (Cochran) Limited: incapable de donner suite, celle-ci a renvoyé le descriptif à la compagnie soeur NEI Nuclear Systems Limited qui a établi un devis estimatif.

- Aalborg-Vaerft A/S, Danemark

  - Intéressée au départ, cette compagnie n'a pas donné suite.

- E. Green & Sons Limited (devenue Senior Green Limited): a envoyé un estimatif.

- Sunrod A.B., Suède: a envoyé un estimatif.

- Bigelow Liptak of Canada Limited: a envoyé un estimatif qu'elle a retiré par la suite.

- Kawasaki Heavy Industries: intéressée au départ, cette compagnie n'a pas donné suite.

- Babcock & Wilcox (Canada) Limited: a envoyé un estimatif (chaudière à resurchauffeur).

Turbines vapeur

- GEC Turbine Generators Limited: a envoyé un estimatif.

- Westinghouse (Canada) Inc.: a envoyé un estimatif.

- De Laval Turbine (Canada) Limited: aucune réponse.

- Kawasaki Heavy Industries: aucune réponse.

Des estimatifs reçus et des suggestions faites de prévoir une turbine vapeur BP intégrée à la chaudière de récupération pour assurer l'alimentation en vapeur pour les besoins du bord, il a été établi que la puissance utile à la sortie

de la turbine pouvait être ramenée de 16 816 à 16 331 kW par une mailleure utilisation de l'énergie disponible dans les gaz d'échappement.

a) Schéma "chaudière de faible puissance"

Le schéma de la NEI prévoit un circuit vapeur BNP mais garde la puissance à la sortie à 16 816 kW.

b) Schémas "chaudière de grande puissance"

Les schémas de Foster Wheeler, Sunrod et de Green prévoient eux aussi le circuit vapeur BP mais ramènent cette puissance à 16 331 kW.

Contenu canadien: voir section 8, ci-dessous.

7. Programme d'exploitation annuel de la flotte

Partant de la traversée type définie et connaissant le taux de vaporisation du GNL à la température ambiante de référence, il sera possible de satisfaire au programme des livraisons prévu pour les années 1992 à 2006, dans les conditions suivantes:

Durée de la traversée, en charge	11 jours 18 heures
Durée de la traversée, sur lest	11 jours 6 heures
Portée utile	54 000 tonnes
Livraison par voyage aller-retour	$2,5614 \times 10^{12}$ kJ (52 125 tonnes)
Livraisons annuelles pour les années 1992 à 2006	$160\ 183 \times 10^{12}$ kJ
Nombre total de voyages aller-retour/an	62,54
Nombre de voyages par navire, par an, en moyenne (5 navires)	12,5, disons 13
Nombre de jours en service par navire par an, en moyenne	313 hours

8. Contenu canadien

La figure 37 montre, en pourcentage, le contenu canadien indiqué par chacun des fabricants ayant établi un estimatif, et celui concernant la turbine à gaz Rolls-Royce RB.211/RT56.

9. Consommation et coût par voyage aller-retour

La figure 38 montre la consommation et le coût par voyage aller-retour sur l'itinéraire Prince-Rupert (C.-B.) et Osaka (Japon), et la figure 39, la consommation et le coût par an, à raison de 13 allers-retours par an.

10. Sujétions et coûts d'entretien mécanique

10.1 Génératuer à gaz RB.211

La conception modulaire de ce générateur fait que la dépose d'un module quelconque ne devra se faire que sur la foi d'une inspection mettant formellement en cause ce module. En effet, ce générateur se compose de 5 modules principaux et de 3 secondaires pouvant être déposés séparément pour les besoins de l'entretien et remplacés par un module remis en état.

La fréquence d'inspection du RB.211 convient parfaitement dans le cas d'un méthanier, c'est-à-dire, hebdomadairement et aux 4 000, 10 000, 16 000, 24 000, 30 000 et 60 000 heures. A noter que l'inspection aux 60 000 heures ne s'applique qu'à la turbine RT56. Tous les travaux d'entretien exigés peuvent se faire à bord, à l'exception de la révision du génératuer aux 24 000 heures et certains éléments faisant partie de l'inspection aux 60 000 heures.

10.2 Coût de l'entretien de la turbine à gaz

L'exploitation de la turbine à gaz Rolls-Royce RB.211/RT56 en pompage de gaz et en forage marin a dégagé un coût global d'entretien de 10,16 $ Can par heure de marche.

Transposé au transport de GNL par 5 méthaniers effectuant 13 allers-retours par an, ce taux donne 73 152 $ Can par an, soit environ 1 1/2 p. cent par an du coût d'un RB.211/RT56.

10.3 Schéma à chaudière de faible puissance

Ce schéma a été écarté en raison du coût élevé de premier établissement.

10.4 Schéma à chaudière grande puissance

L'estimatif du fabricant relatif à l'entretien s'établit à 75 000 $ Can par an.

10.5 Schéma "tout vapeur"

L'estimatif du fabricant s'établit à 98 750 $ Can par an.

11. Coût de premier établissement

La figure 36 en 3 tableaux donne les prix obtenus des fournisseurs concernant les équipements qu'ils proposent. Le prix des hélices et de l'arbre de propulsion a été indiqué pour mettre en relief la différence de coût entre le système à cycle combiné avec hélice à pas variable et le système "tout vapeur" avec hélice à pas fixe. Le prix du réducteur de vitesse ou d'un système de régulation n'est pas indiqué parce qu'il est le même d'un cas à l'autre.

Les coûts d'expédition et d'assurance ont été obtenus des agents maritimes de Rolls-Royce Ltd, à l'égard d'un groupe moto-propulseur complet.

Il ressort des 3 tableaux que le coût global d'un groupe motopropulseur, qu'il soit à cycle combiné ou tout vapeur, tourne autour de dix millions de $ Can, malgré les grandes variations dans le coût des éléments constitutifs. Pour cette raison, il a été jugé inutile d'établir un tableau d'amortissement.

12. Coût du combustible d'appoint et de l'entretien mécanique

Ci-dessous figure un tableau comparatif du coût descombustibles d'appoint et de l'entretien mécanique pour le système à cycle combiné et pour celui "tout vapeur", pour un programme de 10 ans:

	Combustible d'appoint et entretien mécanique en $ Can
Système tout vapeur	31 110 660
Système à cycle combiné	10 190 250
Économie du système à cycle combiné	20 920 410
Avec diesel ou fuel-oil	
Système tout vapeur	24 604 950
Système à cycle combiné	13 404 720
Économie du système à cycle combiné	11 200 230

Il est également possible de calculer les économies réalisables au bout de 20 ans, en tenant compte de l'inflation.

Les taux de change ont été ceux en vigueur mi-juin 1984, c'est-à-dire:

1 $ U.S.	=	1,3 $ Can
1 pound sterling	=	1,8 $ Can

13. Personnel de conduite

Le personnel de conduite requis dans le cas d'une navire équipé d'un groupe motopropulseur à cycle combiné est plus réduit que dans le cas d'un navire comparable, mais "tout vapeur". Par exemple, 6 environ sur un total de 30 dans le premier cas, comparativement à 11, dans le deuxième.

Le système à cycle combiné se prête à un fonctionnement sans surveillance, alors que la chaudière à resurchauffeur, qui comporte de nombreux organes à surveiller, ne saurait être convenablement exploitée avec un personnel réduit.

14. Conclusions et recommandations

a) Conclusions

L'étude a porté sur deux solutions sensées et parfaitement faisables.

La première, celle du système tout vapeur qui emploie une chaudière à resurchauffeur et une turbine vapeur, représente ce qui se fait de mieux dans cette technologie. La chaudière à resurchauffeur est un matériel éprouvé et généralement adopté pour la propulsion des navires-citernes.

La deuxième, celle du système à cycle combiné qui emploie une turbine à gaz RB.211, se place un peu plus à l'avant-garde que l'autre tout en étant aussi compétitive. Ce système associe la technique bien éprouvée de la turbine à gaz à celle également bien connue de la chaudière à récupération alimentant une turbine vapeur.

La démarche adoptée par l'étude a été classique: définition des systèmes, élaboration des descriptifs correspondants, envoi de ces descriptifs des fiches techniques détaillées assorties d'estimatifs et, enfin, évalution du rapport avantages-coût de ces deux systèmes.

Les éléments constitutifs du système tout vapeur sont tous standard, bien qu'il existe des modèles fonctionnant à des températures et pressions plus élevées améliorant le rendement des cycles thermiques. Mais comme ces modèles ne sont pas encore éprouvés, il n'a pas été jugé pratique de les considérer.

Le rendement du système à cycle combiné est élevé dans la mesure où la chaudière de récupération réussit à extraire la plus grande partie de la chaleur sensible contenue dans les gaz d'échappement. Cette aptitude est d'autant plus prononcée que les surfaces d'échange sont grandes, ces dernières étant à leur tour régies par l'encombrement admissible de la chaudière. Mais il est quand même possible de tirer un bon rendement global d'une installation de moyenne puissance par une étude soignée visant à relever au maximum le rendement thermique de la chaudière de récupération. C'est cette approche qui a été adoptée pour cette étude dans le but de trouver une solution fiable et commode à un système propulsif répondant aux exigences définies.

Les deux systèmes de propulsion considérés possèdent un niveau de redondance suffisant pour pallier les défaillances du groupe propulseur principal. Dans le cas du système tout vapeur, la chaudière à resurchauffeur est secourue par une chaudière d'appoint capable d'alimenter les turbines en vapeur HP et, donc, en quantité suffisante pour ramener le navire à bon port. Le système à cycle combiné offre une plus grande souplesse à cet égard puisqu'il est capable de fonctionner malgré l'arrêt total de la turbine vapeur ou de la turbine à gaz et de faire avancer le navire à la vitesse de 11 noeuds.

Comme mentionné plus haut sous "Coût de premier établissement", la question du réducteur de vitesses n'a pas été abordée dans le rapport, ni quant au coût, ni quant à l'entretien. Des études préliminaires avaient été faites sur deux réducteurs pour le système tout vapeur et le système à cycle combiné, en vue de les inclure dans les dessins d'exécution. Mais des études plus poussées seront nécessaires, peut-être dans le cadre d'un projet ultérieur.

Les calculs sur la consommation de combustible montrent clairement les économies réalisables avec le système à cycle combiné, par rapport à celui à vapeur à resurchauffe. La valeur réelle des économies dépendra du type de combustible utilisé comme appoint au GNL vaporisé (appoint nécessaire seulement lorsque le navire se trouve en haute mer) et aussi de l'écart de prix entre ces combustibles. Si du GNL seulement est utilisé, les économies réalisables sont estimées à 1,6 million de $ U.S. par navire et par an, compte non tenu du combustible devant réchauffer le GNL pour en accélérer

la vaporisation. Si on ne veut pas procéder par vaporisation forcée, alors le système à cycle combiné brûlera du combustible diesel comme appoint.

De même, le système à vapeur à resurchauffe pourra brûler du fuel-oil meilleur marché comme appoint et non du GNL vaporisé. Ce serait là la façon la plus économique d'opérer si on optait pour le système tout vapeur.

Malgré la consommation qu'il fait de combustible diesel comme appoint et qui coûte cher, le système à cycle combiné pourra dégager des économies de l'ordre de 0,8 million de $ U.S. par an, comparativement au système à vapeur à resurchauffe qui brûle du fuel-oil comme appoint.

Enfin, le schéma de la chaudière grande puissance où le GNL est utilisé comme combustible d'appoint constitue la façon la plus économique de toutes celles étudiées pour réaliser la propulsion d'un navire-citerne.

b) Recommandations

Bien que la présente étude se soit limitée à la comparaison entre le système à cycle combiné et le système à vapeur à resurchauffe, sous le rapport des performances et du coût, elle a tout de même réussi à montrer que le concept du cycle combiné est faisable, qu'il permet de réaliser d'appréciables économies et qu'il ouvre au Canada la perspective d'importants travaux de recherche dans ce domaine.

Ce système pourra donc être sérieusement envisagé pour la propulsion d'un méthanier présentant les caractéristiques précédemment définies. Mais il est des secteurs où une recherche plus poussée aiderait à la mise au point d'une spécification concernant un tel méthanier. Ces secteurs sont les suivants:

1. comparaison entre un système à hélice à pas variable et un à réducteur permettant de renverser les vitesses,

2. comparaison entre diverses méthodes pour la production de l'énergie électrique à bord,

3. étude plus détaillées des coûts d'entretien et remise en état, et des salaires du personnel de conduite, rapportés au coût d'un système de propulsion complet,

4. analyse du système de commande pour système à cycle combiné et simulation dynamique des performances globales de ce dernier,

5. étude systématique globale vérifiant l'interaction possible entre l'architecture du navire et les divers systèmes de propulsion étudiés, et permettant de dégager le rapport avantages-coût global.

Rolls-Royce serait heureuse de pouvoir participer aux études permettant de tirer au clair ces questions, parmi d'autres.

1) Figure 34 SCHÉMA DE PRINCIPE - SYSTÈME A CYCLE COMBINÉ

2) Chaudière de récupération

3) *Fonctionnant en autonome à la puissance maximale en service continu, la chaudière fournit 92,58 M à 480 C 514 H

4) Surchauffeur

5) Brûleurs

6) Gax d'échappement

7) Température de référence de l'air ambiant

8) Module RB.211/RT56

9) GNL vaporisé 0,9375 M
GNL d'appoint 0,0831 M

10) Soutirage de GNL

11) Compresseur 600 kW

12) Groupe électrogène diesel

13) Énergie électrique pour remplir et vider les citernes et pour le propulseur d'étrave

14) 2000 kW d'énergie électrique pour les besoins du bord

15) Turbogénérateur à vapeur

16) Réducteur de vitesses

17) Turbine vapeur de propulsion

18) Chaudière d'appoint

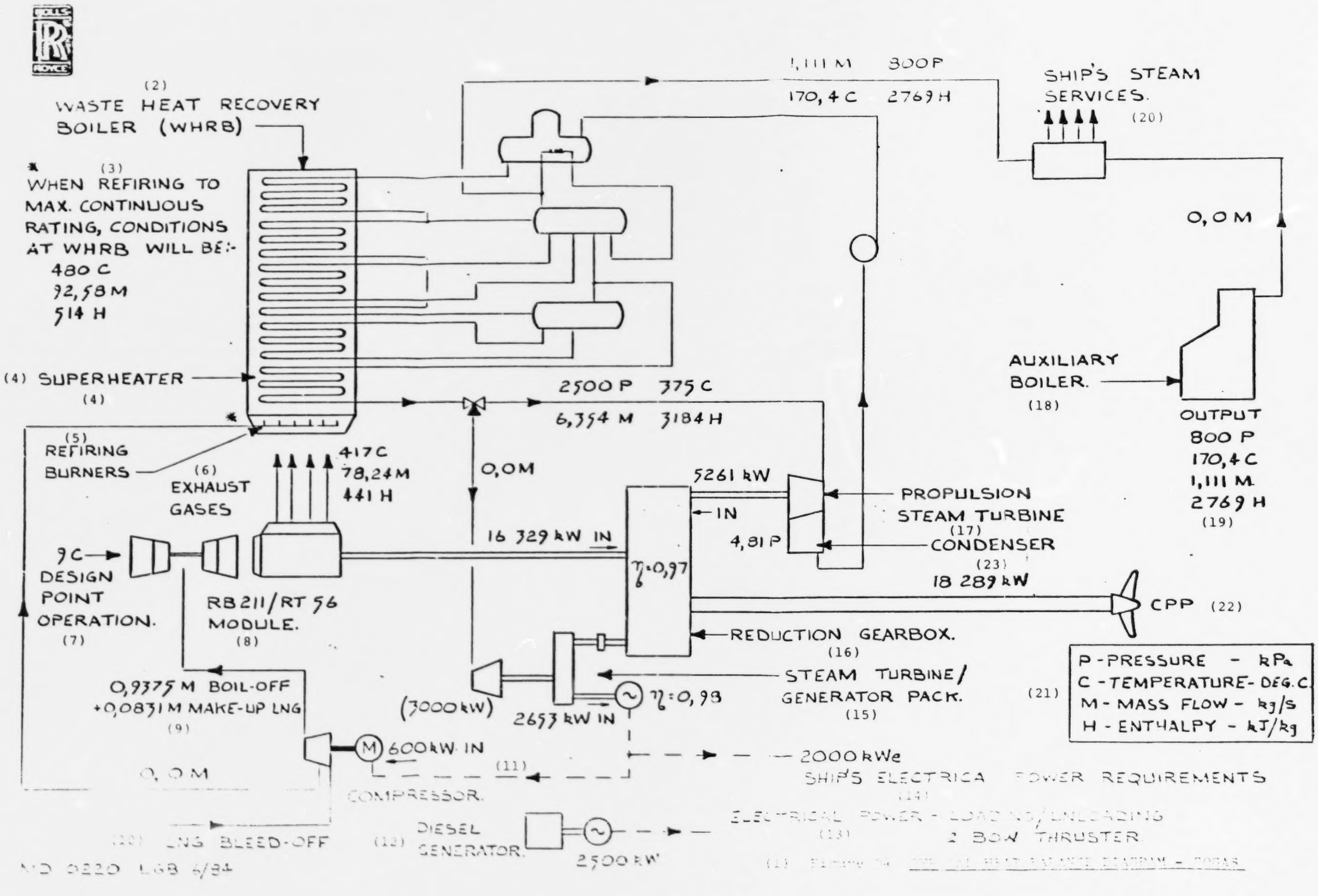
19) Puissance de sortie 800 P 170,4 C 1,111 M

20) Énergie vapeur pour les besoins du bord

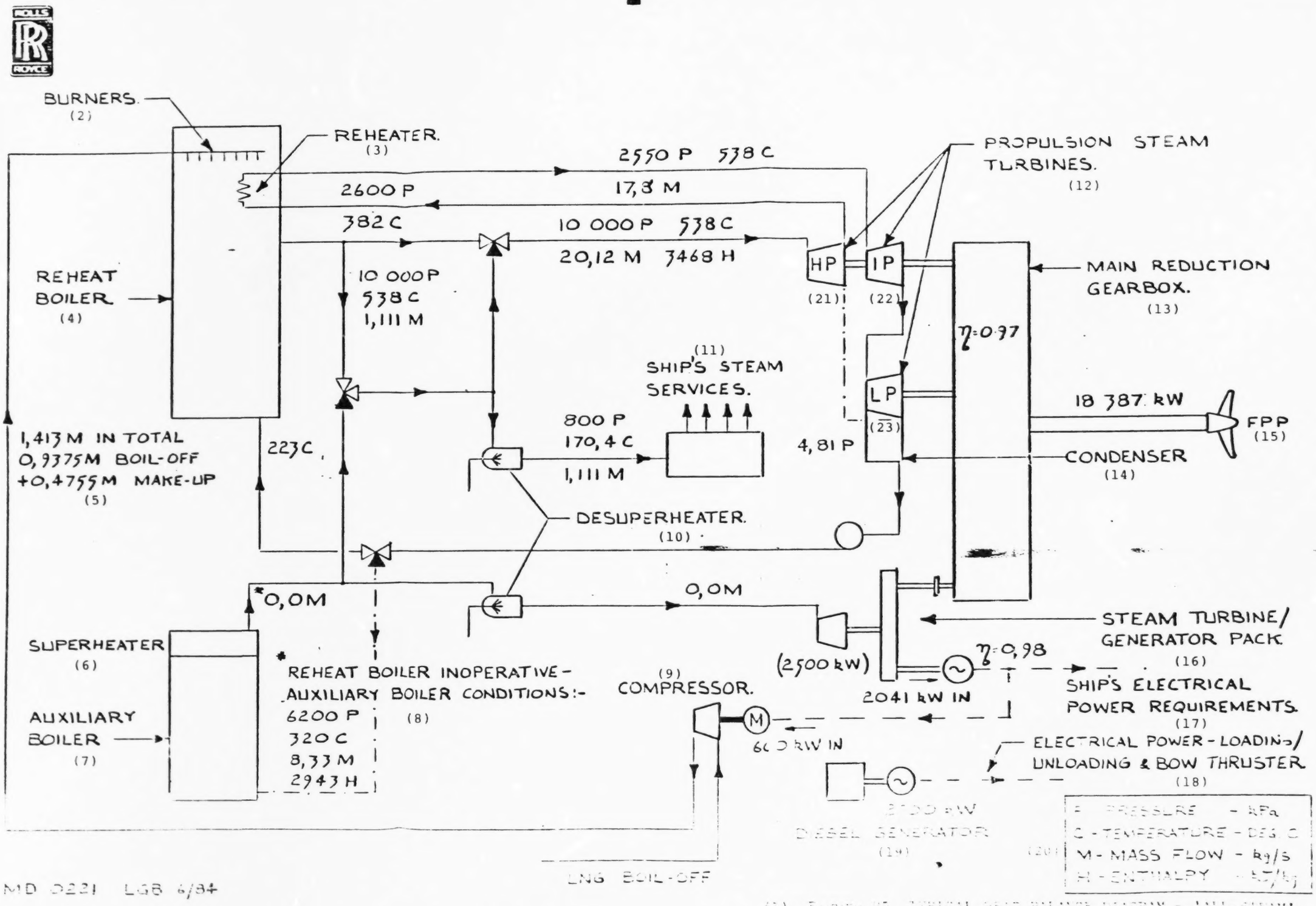
21) P - Pression en kPa
C - Température en °C
M - Débit massique en kg/s
H - Enthalpie massique en kJ/kg

22) Hélice à pas variable

23) Condenseur


(2)
WASTE HEAT RECOVERY BOILER (WHRB)
* (3)
WHEN REFIRING TO MAX. CONTINUOUS RATING, CONDITIONS AT WHRB WILL BE:-
480 C
92,58 M
514 H
(4) SUPERHEATER
(4)
(5)
REFIRING BURNERS
(6)
EXHAUST GASES
417C
78,24M
441 H
1,111 M 300P
170,4 C 2769 H
SHIP'S STEAM SERVICES.
(20)
0,0 M
AUXILIARY BOILER.
(18)
OUTPUT
800 P
170,4 C
1,111 M
2769 H
(19)
2500 P 375 C
6,354 M 3184 H
0,0M
5261 kW
IN
4,81 P
PROPULSION STEAM TURBINE
(17)
CONDENSER
(23)
18 289 kW
16 329 kW IN
η=0,97
9C
DESIGN POINT OPERATION.
(7)
RB211/RT 56 MODULE.
(8)
CPP (22)
REDUCTION GEARBOX.
(16)
STEAM TURBINE/ GENERATOR PACK.
(15)
η=0,98
(3000kW)
2653 kW IN
0,9375 M BOIL-OFF
+0,0831 M MAKE-UP LNG
(9)
M 600kW IN
(11)
COMPRESSOR.
0,0 M
(10) LNG BLEED-OFF
(12) DIESEL GENERATOR.
2500 kW
2000 kWe
SHIPS ELECTRICAL POWER REQUIREMENTS
(14)
ELECTRICAL POWER - LOADING/UNLOADING
(13)
2 BOW THRUSTER
P - PRESSURE - kPa
C - TEMPERATURE - DEG. C
M - MASS FLOW - kg/s
H - ENTHALPY - kJ/kg
(21)

1) Figure 35 SCHÉMA DE PRINCIPE - SYSTÈME TOUT VAPEUR
2) Brûleurs
3) Resurchauffeur
4) Chaudière à vapeur à resurchauffe
5) GNL vaporisé 0,9375 M
   Appoint 0,4755 M
   Total 1,413 M
6) Surchauffeur
7) Chaudière d'appoint
8) *En cas de défaillance de la chaudière principale, la chaudière d'appoint fournit 8,33 M à 6200 P 320 C; 2943 H
9) Compresseur
10) Désurchauffeur
11) Énergie vapeur pour les besoins de propulsion
12) Turbines vapeur de propulsion
13) Réducteur de vitesses principal
14) Condenseur
15) Hélice à pas fixe
16) Turbogénérateur à vapeur
17) Énergie électrique pour les besoins du bord
18) Énergie électrique pour remplir et vider les citernes et pour le propulseur d'étrave
19) Groupe électrogène diesel
20) P - Pression en kPa
    C - Température en °C
    M - Débit massique en kg/s
    H - Enthalpie massique en kJ/kg
21) HP
22) PI
23) BP



(1) FIGURE 03 TYPICAL STEAM PLANT DIAGRAM - "ALL-STEAM"

1) Figure 36 COÛT DE PREMIER ÉTABLISSEMENT (Tableau 1)

2) COÛT DE PREMIER ÉTABLISSEMENT (en millions de $ Can par navire)

3) Cycle combiné

4) Chaudière principale

5) Chaudière d'appoint

6) Turbine vapeur principale

7) Turbine vapeur d'appoint/condenseur

8) Turbogénérateur

9) Hélices et arbres de propulsion

10) Turbine à gaz

11) Sous-total

12) Total

13) Fournisseur

14) Générateur à gaz
Turbine de propulsion

15) COÛT

16) Installation principale

17) Pièces, outils

18) Expédition/Assurance

19) Inclus dans le coût de l'installation principale

20) REMARQUES:

Taux de change pris en compte: 1 pound sterling = 1,8 $ Can
et pour Sunrod, 6 1/2 couronnes suédoises = 1 $ Can.

Le coût de l'installation principale de propulsion est coté FAB, au port d'origine.

Le coût d'expédition estimatif a été établi pour l'expédition du pays d'origine à un chantier naval de Kobé au Japon, ou sur une distance comparable. Dans certains cas, le coût de l'emballage a été pris en compte.

Les options A et B sont considérées comme les plus intéressantes en schéma cycle combiné. Les autres options sont données à titre indicatif.

Dans le cas de la turbine à gaz RB.211/RT56, la quantité de pièces de rechange à prévoir s'applique à la flotte de base de 5 navires, c'est-à-dire les pièces formant un générateur à gaz complet et deux modules 04: poste et chambre de combustion.

(2)
PLANT ACQUISITION COSTS

(Canadian dollars (Million) per ship set)

(3) COGAS

	OPTION A				OPTION B				
	Supplier (13)	(15) COSTS Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.	Supplier (13)	(15) COSTS Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.	
Main Boiler (4)	N.E.I. WH RB	(16) 1,67	(17) 0,03	(18)	Foster Wheeler WH RB	(16) 1,43	(17) 0,045	(18)	NOTES: (20)
Auxiliary Boiler (5)	N.E.I.				Greens	0,07	0,002		The budgetary costs in Canadian dollars are based on an exchange rate of 1,8 C $ to 1,0 pound sterling. For "Sunrod" an exchange rate of 6,5 Swedish Krona to 1,0 Canadian dollars has been assumed.
Main Steam Turbine (6)	Westinghouse	0,55	Incl. in main cost (19)	0,16	Westinghouse	0,55		0,15	The cost of the main plant is generally given FOB at the port of the country of manufacture.
Auxiliary Steam Turbine Condenser (7)	Westinghouse	0,63	Incl. in main cost (19)		Westinghouse	0,63	Incl. in main cost (19)		Shipping cost estimates allow for shipping from the country of manufacture to an assumed shipbuilder in Kobe, Japan, or similar. An allowance for crating, where applicable, has been made in the shipping costs.
Generator (8)	Westinghouse				Westinghouse				Options A and B are considered to be the main options for the COGAS plant, the remaining three are shown for comparison.
Propellers and Shafting (9)	Stone Vickers	0,86	Incl.in main cost (19)		Stone Vickers	0,86	Incl. in main cost (19)		Spare provisioning for the RB 211/RT 56 considers a basic 5 ship fleet with base spares of one complete gas generator and two 04 module hot sections and combustion units.
Gas Turbine (10)	RB 211 Gas Generator RT 56 Power Turbine (14)	5,04	0,99	0,07	RB 211 Gas Generator RT 56 Power Turbine (14)	5,04	0,99	0,07	
Sub Total (11)		8,75	1,02	0,23		8,58	1,04	0,22	
Total (12)			10				9,81		

1) Figure 36 COÛT DE PREMIER ÉTABLISSEMENT (tableau 2)

2) COÛT DE PREMIER ÉTABLISSEMENT (en millions de $ Can par navire)

3) Cycle combiné

4) Chaudière principale

5) Chaudière d'appoint

6) Turbine vapeur principale

7) Turbine vapeur d'appoint/condenseur

8) Turbogénérateur

9) Hélices et arbres de propulsion

10) Turbine à gaz

11) Sous-total

12) Total

13) Fournisseur

14) Générateur à gaz/
Turbine de propulsion

15) COÛT

16) Installation principale

17) Pièces, outils

18) Expédition/Assurance

19) Inclus dans le coût de l'installation principale

(2)
PLANT ACQUISITION COSTS
(Canadian dollars (Million) per ship set)

COGAS
(3)

		(15) COSTS				(15) COSTS				(15) COSTS		
	Supplier (13)	Main Plant (16)	Spares, Tooling (17)	Shpg: Ins. (18)	Supplier (13)	Main Plant (16)	Spares, Tooling (17)	Shpg: Ins. (18)	Supplier (13)	Main Plant (16)	Spares, Tooling (17)	Shpg: Ins. (18)
Main Boiler (4)	Foster Wheeler	1,43	0,045		Greens	0,87	0,03		Sunrod	2,86	0,1	
Auxiliary Boiler (5)	Greens	0,072	0,002		Greens	0,072	0,002		Sunrod	0,05	0,0018	
Main Steam Turbine (6)	G.E.C.	0,814	Incl.in main cost (19)	0,18	Westinghouse	0,55	Incl.in main cost (19)	0,12	Westinghouse	0,55	Incl.in main cost (19)	0,15
Auxiliary Steam Turbine and Condenser (7)	Westinghouse	0,63	Incl.in main cost (19)		Westinghouse	0,63	Incl.in main cost (19)		Westinghouse	0,63	Incl.in main cost (19)	
Generator (8)	Westinghouse				Westinghouse				Westinghouse			
Propellers & Shafting (9)	Stone Vickers	0,86	Incl.in main cost (19)	-	Stone Vickers	0,86	Incl.in main cost (19)		Stone Vickers	0,36	Incl.in main cost (19)	
Gas Turbine (10)	RB 211 / RT 56 Power Turbine (14)	5,04	0,99	0,07	RB 211 Gas Generator RT 56 Power Turbine (14)	5,04	0,99	0,07	RB 211 Gas Generator RT 56 Power Turbine (14)	5,04	0,99	0,07
Sub Total		8,85	1,04	0,25		8					1,132	0,22
Total (12)			10,14				9,23				11,3	

Figure 2b. PLANT ACQUISITION COSTS (Phase 1)
(1)

1) Figure 36 COÛT DE PREMIER ÉTABLISSEMENT (tableau 3)

2) COÛT DE PREMIER ÉTABLISSEMENT (en millions de $ Can par navire)

3) Tout vapeur

4) Chaudière principale

5) Chaudière d'appoint

6) Turbine vapeur principale

7) Turbine vapeur d'appoint/condenseur/turbogénérateur

8) Hélices et arbres de propulsion

9) Sous-total

10) Total

11) Fournisseur

12) COÛT

13) Installation principale

14) Pièces, outils

15) Expédition/Assurance

16) Inclus dans le coût de l'installation principale

17) REMARQUES:

L'option C est considérée comme la plus intéressante au schéma "tout vapeur". L'autre option est donnée à titre indicatif.

PLANT ACQUISITION COSTS (2)

(Canadian dollars (Million) per ship set)

ALL-STEAM (3)

	OPTION C								
	Supplier (11)	COSTS (12) Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.	Supplier (11)	COSTS (12) Main Plant	Spares, Tooling	Shpg: Ins.	
Main Boiler (4)	Foster Wheeler	(13) 2,63	(14) 0,09	(15)	Sunrod	(13) 4,62	(14) 0,16	(15)	NOTES: (17) Option C is considered as the main contender for the 'All-Steam' plant. The other plant combination is shown for comparison
Auxiliary Boiler (5)	Foster Wheeler	1,32	0,05	0,56	Sunrod			0,60	
Main Steam Turbine (6)	G.E.C.	4,25	Incl. in main cost (16)		G.E.C.	4,25	Inc. in main cost (16)		
(7) Auxiliary Steam Turbine and Condenser and Generator	Westinghouse	0,63	Incl. in main cost (16)		Westinghouse	0,63	Inc. in main cost (16)		
Propellers & Shafting (8)	-	0,4	Incl. in main cost (16)		-	0,4	Incl.in main cost (16)		
Sub total (9)		9,23	0,14	0,56		9,9	0,16	0,60	
(10) Total									

FABRICANT	SYSTÈME PROPULSIF	CONTENU CANADIEN (en %)
Rolls-Royce Canada Ltd.	Turbine à gaz RB.211/RT56	50
Foster Wheeler Power Products Ltd	Chaudière de récupération (cycle combiné) Chaudière à resurchauffeur (tout vapeur)	85 85
Sunrod AB Suède	Chaudière de récupération (cycle combiné) Chaudière à resurchauffeur (tout vapeur)	L'entreprise est disposée à s'approvisionner au Canada pour tous les éléments sauf les chaudières
Senior Green Ltd	Chaudière de récupération (cycle combiné)	Promet un contenu canadien en proportion élevée
N.E.I.	Chaudière de récupération (cycle combiné)	Des pourparlers sur l'octroi de licence à des fabricants canadiens sont en cours
G.F.C. Trubine Generators Ltd	Turbine à vapeur (cycle combiné) Turbine à vapeur de resurchauffe (tout vapeur)	35 35
Westinghouse Canada	Turbine vapeur (cycle combiné)	100

Figure 37 CONTENU CANADIEN

CONSOMMATION ET COÛT PAR VOYAGE

MARCHE EN CHARGE/SUR LEST

240 h par 17,5 NOEUDS, AIR AMBIANT À 9°C

	Schéma faible puissance	Schéma grande puissance	Tout vapeur Chaudière à resurchauffeur
Consommation totale de GNL, tous besoins confondus, en tonnes/heure	3,764/3,59	3,674/3,497	5,086/4,78
Consommation de GNL vaporisé, en tonnes/heure	3,375/2,7	3,375/2,7	3,375/2,7
GNL d'appoint par vaporisation forcée, en tonnes/heure	0,389/0,890	0,299/0,797	1,711/2,080
Coût du combustible d'appoint, en $ U.S.	18159/41545	13957/37204	79870/97074
Consommation en combustible d'appoint, en tonnes/heure combustible diesel (cycle combiné) ou fuel-oil (tout vapeur)	0,446/1,022	0,343/0,915	1,877/2,282
Coût du combustible d'appoint, en $ U.S.	24833/56905	19098/50947	62617/76128

Figure 38 CONSOMMATION ET COÛT PAR VOYAGE, MARCHE EN CHARGE ET SUR LEST

CONSOMMATION PAR NAVIRE PAR AN À RAISON
DE 13 VOYAGES PAR AN, EN TONNES MÉTRIQUES

	Schéma faible puissance	Schéma grande puissance	Tout vapeur chaudière à resurchauffeur
GNL vaporisé d'appoint	3991	3420	11 828
Combustible diesel d'appoint (cycle combiné) ou fuel-oil (système tout vapeur)	4580	3925	12 976

COÛT PAR NAVIRE PAR AN À RAISON
DE 13 VOYAGES PAR AN, EN $ U.S.

	Schéma faible puissance	Schéma grande puissance	Tout vapeur
GNL vaporisé d'appoint	776 152	665 093	2 300 532
Combustible diesel d'appoint (cycle combiné) ou fuel-oil (système tout vapeur)	1 062 594	910 585	1 803 685

PRIX DU COMBUSTIBLE DIESEL: 232 $ U.S. LA TONNE
FUEL-OIL: 139 $ U.S. LA TONNE
GNL(fab): 194,5 $ U.S. LA TONNE

Figure 39 CONSOMMATION ET COÛT PAR NAVIRE ET PAR AN